

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181061

# 具有故障隔离能力的柔性多状态开关拓扑及控制技术研究

高泽盟<sup>1,2</sup>, 葛菁<sup>2</sup>, 王剑锋<sup>3</sup>, 徐轲<sup>3</sup>, 李卫国<sup>1</sup>, 王朝亮<sup>4</sup>, 许烽<sup>4</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 先进输电技术国家重点实验室(全球能源互联网研究院), 北京 102209;  
3. 国网天津市电力公司, 天津 300010; 4. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 交流配电网普遍存在闭环设计、开环运行的现象, 导致负荷转供速度慢, 馈线功率不均衡。同时直流负荷的增加以及新能源渗透率的提高给配电网运行控制带来了新的挑战, 要求配电网具备更强的潮流调节能力。为解决上述问题, 研究了用于配电网馈线互联的柔性多状态开关(Soft Multi-State Open Point, SMOP)技术, 提出基于双钳位子模块(Double Clamp Sub-Module, DCSM)的四端口模块化拓扑结构。基于其数学模型分析, 确定了各端口的运行范围, 设计控制系统结构并提出自愈控制策略。最后基于 PSCAD 搭建了四端口柔性多状态开关仿真模型, 验证了所提拓扑及控制策略的有效性。

**关键词:** 柔性多状态开关; 拓扑设计; 运行范围; 潮流控制

## Research on topology and control technology of soft multi-state open point based with fault isolation capability

GAO Zemeng<sup>1,2</sup>, GE Jing<sup>2</sup>, WANG Jianfeng<sup>3</sup>, XU Ke<sup>3</sup>, LI Weiguo<sup>1</sup>, WANG Chaoliang<sup>4</sup>, XU Feng<sup>4</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute), Beijing 102209, China; 3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 4. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The common phenomenon of open-loop operation of closed-loop designed distribution networks leads to a slow load transfer speed and unbalanced feeder power. Meanwhile, the increasing amount of DC loads and the growth of new permeability have brought new challenges to the operation control of distribution network, which requires stronger power flow regulation ability. This paper carries out the study of Soft Multi-state Open Point (SMOP) technology used in distribution network feeder in order to meet the aforementioned challenges. A topology of a four-terminal SMOP based on Double Clamp Sub-Module (DCSM) is proposed followed by its mathematical model analysis. Based on the mathematical model, the operating range of the proposed topology is then determined. After that, the structure of control system and a self-healing control strategy is designed for the SMOP. A four-terminal SMOP simulation model based on PSCAD/EMTDC is constructed in which the validity of the proposed topology and its control strategy are verified.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903100) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 521104170043).

**Key words:** soft multi-state open point (SMOP); topology design; operating range; power flow regulation

## 0 引言

分布式可再生能源的急剧涌现与快速增长, 以电动汽车为代表的新型负荷的大规模接入, 使得配电网呈现出新的特点, 由此引发的问题也越发复杂

和凸显<sup>[1]</sup>, 主要表现为: 功率流向日趋复杂, 负载波动加剧; 短路电流增大, 设备选型困难且寿命缩短; 电压越限等电能质量问题日益突出, 供电可靠性降低; 配电网继电保护灵敏度变化, 造成保护的误动和拒动等, 已严重影响系统的稳定性以及运行的安全性<sup>[2-4]</sup>。为保证配电网的电能质量及供电可靠性, 主动配电网技术以及各种面向配网的电力电子设备得到了各国学者的重视, 其中柔性开关设备关

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB0903100); 国家电网公司科技项目资助(521104170043)

键技术逐渐成为配电网领域一个新的研究热点。

柔性多状态开关是一种可在配电网若干关键节点上替代传统联络开关的新型柔性一次设备<sup>[5]</sup>。与传统联络开关相比, 不仅具备通和断两种状态, 而且没有传统机械式开关动作次数的限制, 增加了功率连续可控状态, 兼具运行模式柔性切换, 控制方式灵活多样等特点<sup>[6-7]</sup>。近些年, 国内外学者开始高度关注柔性多状态开关在配网中应用的关键技术。2007年日本电力工业中央研究院提出环网平衡控制器(Loop Balance Controller, LBC)的概念<sup>[8]</sup>, 完成了6.6 kV/1 MVA的示范项目并投运, 其可实现两条配网馈线之间的负载均衡, 并提高馈线末端电压调节能力, 但对于分布式电源具有明显的局限性。2010年英国帝国理工学院提出了SNOP(Soft Normally Open Point)概念, 以期望部分替代配电网中的联络开关、分段开关等传统一次开关设备, 可实现运行模式的柔性切换功率灵活控制, 因此可视为柔性多状态开关雏形<sup>[9]</sup>。2011年台湾国立中山大学提出LPC(Loop Power Controller)概念<sup>[10]</sup>, 采用多条配网馈线互联形成环网结构, 可实现多条馈线的潮流互补与负荷均衡, 但不具备直流侧故障清除能力。

本文对柔性多状态开关的原理与特点作了简要介绍, 设计出具有直流故障隔离能力的四端柔性开关拓扑、控制系统结构与策略, 并进行仿真验证, 为柔性开关设备的具体实现提供了一种可行方案, 有助于推进其在配电网中的应用。

## 1 拓扑及故障隔离原理

中低压配电网中多样化定制电力需求、多种电压规格与接线方式对柔性多状态开关的拓扑选型与参数配置形成了挑战。相比交-交变换, 交直功率变换技术更加成熟, 且背靠背拓扑更适应多端馈线互联<sup>[11]</sup>。

图1为四端柔性多状态开关拓扑, 相比于双端柔性开关设备, 多端柔性开关设备能实现多条馈线连接, 降低了建设成本, 经济性显著提高。并且当多端柔性开关设备某一端由于故障而退出运行时, 其余变流器通过柔性切换工作模式, 可继续支撑电网的正常运行, 更为灵活和可靠。

常规模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)在发生直流双极短路故障时, 交流系统经过二极管直接与直流短路点构成通路, 因此不具备清除直流故障电流的能力<sup>[12-13]</sup>。为快速切断双极短路故障, 往往不能省略直流断路器。相比于半桥子模块(Half Bridge Sub-Module, HBSM), DCSM具有直流侧故障电流闭锁能力, 其可在发生直流故

障时通过闭锁所有IGBT的触发信号和利用二极管的反向阻断能力迅速完成闭锁过程, 从而达到无需交流断路器动作实现清除直流故障的目的, 提高了多端互联系统的可靠性。同时其在调制策略、数学模型、控制器设计等方面HBSM的通用性更好<sup>[14]</sup>。

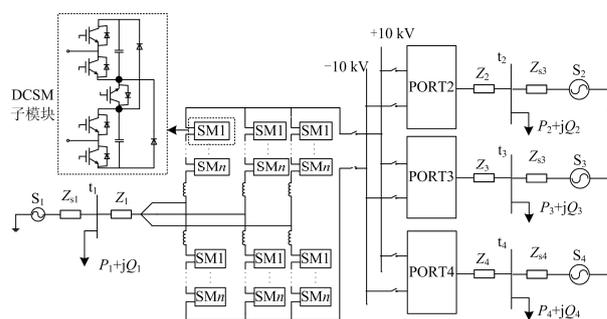


图1 四端柔性多状态开关拓扑结构

Fig. 1 Three-terminal SMOP topology

DCSM切断直流双极短路故障的原理如图2所示, 在直流侧发生故障后, 模块中所有IGBT闭锁, 即T1、T2、T3、T4、T5均闭锁, 二极管与电容构成电流通路。DCSM的电流通路分为 $i_{SM} > 0$ 和 $i_{SM} < 0$ 两种情况, 而交流侧可以向直流侧馈入故障电流则对应 $i_{SM} < 0$ 的情况, 此时上下桥臂中的DCSM相当于将子模块的电容电压和二极管串联。

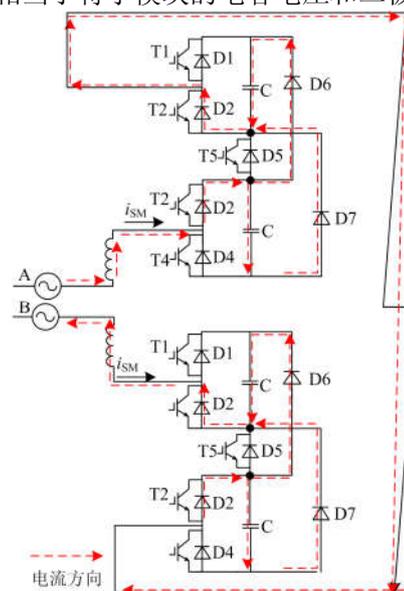


图2 DCSM限制双极短路故障原理示意图

Fig. 2 DCSM DC bipolar short-circuit fault current limitation

以ab相回路为例, 若使电路中出现故障电流, 必须满足ab相间线电压大于N个子模块投入时的直流侧电压, 如式(1)。

$$U_{ab} > 2NU_c \quad (1)$$

式中:  $U_{ab}$  为 ab 相间线电压;  $N$  为投入子模块个数;  $U_c$  为单个子模块的电容电压。

正常工作时的调制度小于等于 1, 所以直流侧电压大于等于 2 倍相电压峰值, 即

$$2NU_c \geq 2U_m = \frac{2}{\sqrt{3}}U_{abm} \quad (2)$$

式中:  $U_m$  为相电压峰值;  $U_{abm}$  为 ab 相间线电压峰值。

由此可得, 不满足式(1)。因此交流侧与换流器之间没有电流流通, 从而故障后交流侧不会向直流故障点馈入交流电流, 并可实现换流器自己清除直流侧故障电流。

## 2 数学模型

### 2.1 稳态模型

柔性多状态开关稳态有功潮流转移指令由配电网管理系统或者柔性多状态开关中央控制单元根据四端馈线负载均衡度优化计算获得<sup>[15]</sup>。

柔性多状态开关一侧稳态等效电路如图 3 所示, 各端 MMC 通过不同的线路的等效阻抗, 连接负荷及对应的交流系统。设注入换流器  $i(i=1,2,3,4)$  的有功功率为  $P_{vi}$ , 无功功率为  $Q_{vi}$ , 负荷与换流器之间阻抗为  $r_i+jx_i$ , 负荷母线电压为  $U_{li} \angle \delta_i$ , 交流系统与负荷母线之间阻抗为  $r_{si}+jx_{si}$ , 交流系统母线电压为  $U_{si} \angle 0$ , 交流系统注入有功功率为  $P_{si}$ , 注入无功功率为  $Q_{si}$ , 负荷母线流出有功功率  $P_i$ , 流出无功功率  $Q_i$ 。系统各电气量在图 3 中标注, 对于该侧, 经过推导可得阻抗  $r_i+jx_i$  上的损耗、 $r_{si}+jx_{si}$  上的损耗表达式如式(3)所示, 交流系统发出的功率及负荷母线点电压表达式如式(4)所示。

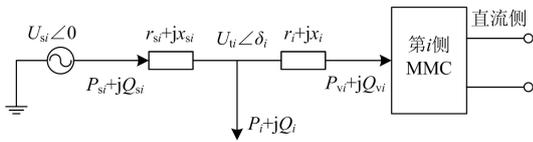


图 3 柔性多状态开关一侧等效电路图

Fig. 3 Stable equivalent circuit of one side of SMOP

$$\begin{cases} \Delta \dot{S}_i = \frac{P_{vi}^2 + Q_{vi}^2}{U_N^2} (r_i + jx_i) = \Delta P_i + j\Delta Q_i \\ \Delta \dot{S}_{si} = \frac{(P_i + P_{vi} + \Delta P_i)^2 + (Q_i + Q_{vi} + \Delta Q_i)^2}{U_N^2} (r_{si} + jx_{si}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \dot{S}_{si} = \dot{S}_{vi} + \dot{S}_i + \Delta \dot{S}_i + \Delta \dot{S}_{si} = P_{si} + jQ_{si} \\ \dot{U}_{li} = \dot{U}_{si} - \left( \frac{P_{si} r_{si} + Q_{si} x_{si}}{U_{si}} + j \frac{P_{si} x_{si} - Q_{si} r_{si}}{U_{si}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

第  $i$  侧换流器容量限制对  $i$  侧注入变流器功率的运行范围的影响为

$$P_{vi}^2 + Q_{vi}^2 \leq S_{mi}^2 \quad (5)$$

此外, 负荷母线电压的波动范围限制也对变流器功率运行范围产生约束<sup>[16]</sup>:

$$U_N(1-7\%) \leq U_{li} \leq U_N(1+7\%) \quad (6)$$

求解以上两式可得  $i$  侧注入变流器的功率运行范围。同时在忽略直流侧损耗的情况下, 多状态开关四端还应满足功率平衡约束, 即

$$\begin{cases} P_{v1} + P_{v2} + P_{v3} + P_{v4} = 0 \\ Q_{v1} + Q_{v2} + Q_{v3} + Q_{v4} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解上述方程即得到柔性多状态开关四端的功率运行范围。

### 2.2 动态模型

柔性多状态开关的动态模型如图 4 所示, 图中  $u_{umi}(m=a,b,c, \text{表示 } abc \text{ 三相}; i=1,2,3,4, \text{表示端子数})$  为各端交流侧侧相电压  $u_{vmi}$  为各相上下桥臂电抗器与子模块连接处的等电位点电压,  $R_i$  为各端交流侧等效电阻,  $L_i$  为线路和桥臂电抗串联后的等效电抗。

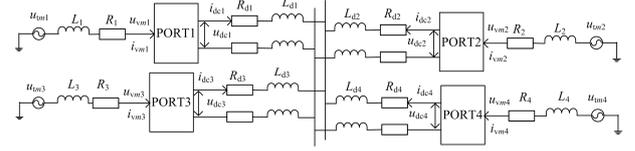


图 4 四端柔性多状态开关动态等效电路图

Fig. 4 Dynamic equivalent circuit of four-terminal SMOP

根据基尔霍夫电路定律, 可得四端柔性多状态开关系统各换流器交流侧方程组为

$$L_i \frac{d\mathbf{I}_i}{dt} = -R_i \mathbf{I}_i + (\mathbf{U}_{li} - \mathbf{U}_{vi}) \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{I}_i$ 、 $\mathbf{U}_{li}$ 、 $\mathbf{U}_{vi}$  均为第  $i$  端交流侧三相列向量。将式(8)在 abc 基准坐标下的参量转换到旋转 dq 坐标下, 得到

$$L_i \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_i & \omega L_i \\ -\omega L_i & -R_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{di} \\ i_{qi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{tdi} - u_{vdi} \\ u_{tqi} - u_{vqi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $i_{di}$ 、 $i_{qi}$  分别为第  $i$  个换流站的交流电流矢量的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{tdi}$ 、 $u_{tqi}$  为第  $i$  个换流站的交流系统电压矢量的  $d$ 、 $q$  轴分量; 而  $u_{vdi}$ 、 $u_{vqi}$  为第  $i$  个换流站的桥臂电抗换流器侧等电位点电压矢量的  $d$ 、 $q$  轴分量。在直流侧,  $R_{di}$  为各端直流侧到多端并连接点处的直线路等效电阻,  $L_{di}$  为相应的线路电感。根据直流网络潮流计算方法可得直流侧电压电流关系式为

$$\begin{cases} V_i = u_{dci} - L_{di} \frac{di_{dci}}{dt} - i_{dci} R_{di} \\ V_1 = V_2 = V_3 = V_4 \\ i_{dci} + i_{dc2} + i_{dc3} + i_{dc4} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $V_i$ 、 $u_{dci}$ 、 $i_{dci}$  均为矩阵列向量;  $V_i$  为直流线路并联连接点电压。

根据瞬时功率理论和 park 变换, 可以得到第  $i$  个换流器交流侧注入换流器的有功功率和无功功率的  $dq$  坐标表达式分别为

$$\begin{cases} P_{si} = \frac{3}{2}(u_{tdi}i_{di} + u_{sqi}i_{qi}) \\ Q_{si} = -\frac{3}{2}(u_{tdi}i_{qi} - u_{sqi}i_{di}) \end{cases} \quad (11)$$

忽略直流侧和换流器损耗, 则有

$$\frac{2}{3}U_u i_{di} = u_{dci} i_{dci} \quad (12)$$

式(9)一式(12)表征的交流侧方程、直流侧方程与功率平衡方程即为四端 MMC 柔性多状态开关系统在  $dq$  坐标系下的动态数学模型。

### 3 控制策略

#### 3.1 整体控制系统结构

柔性多状态开关系统按层级将其控制分为系统级控制、装置级控制和阀级控制。系统级控制实现多端功率互给调节, 协调四端换流站间的功率分配和电压稳定, 使直流输电系统整体损耗最小, 功率和电压分配达到最优, 得到装置级控制的功率电压参考值。装置级控制接收系统控制层指令, 实现定直流电压、定有功、无功功率控制或交流电压控制, 得到调制波的幅值和相角, 作为阀级控制的输入量。阀级控制负责实现 IGBT 触发控制、环流控制、模块均压控制。整体控制系统结构图如图 5 所示。



图 5 整体控制系统结构图

Fig. 5 Overall control system structure

##### 3.1.1 系统控制层

采用主从控制方式, 主要分为三种控制模式: 定直流电压控制、定有功无功功率控制以及定交流电压控制。主换流站采用定直流电压控制, 其控制目标是控制柔性多状态开关直流侧电压, 为另三端

从换流站提供稳定的直流电压; 从换流站采用定有功无功功率控制或定交流电压控制。具有一定的功率调节范围的从换流站, 其控制目标是调节系统有功和无功功率; 与无源网络连接、本身不具备功率调节能力的从换流站, 工作在定交流电压的控制方式。

##### 3.1.2 装置控制层

装置级控制采用直接电流控制的方法, 包括外环控制和内环电流控制。外环控制接收系统级控制给出的功率电压参考值, 采用比例积分的控制环节得到内环电流的参考值, 内环电流控制采用前馈解耦的控制方式, 最终输出调制波。不同控制方式下的外环控制结构图以及内环电流控制结构图如图 6 所示。

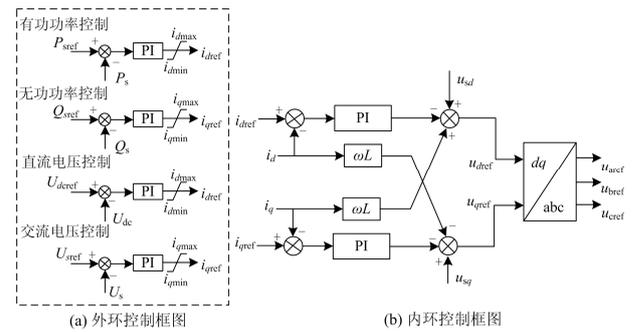


图 6 装置层控制框图

Fig. 6 Device control layer

##### 3.1.3 阀控层

阀级控制包括环流控制、电容电压均衡控制和 IGBT 触发控制。环流控制以抑制桥臂电流中的负序二倍频分量为目标, 得到电抗补偿压降叠加到桥臂调制波中, 其中二倍频负序电流抑制算法控制效果良好<sup>[17]</sup>。

模块数较多时可采用最近电平逼近策略, 采用排序法即可实现桥臂模块电容电压的均衡<sup>[18]</sup>。但在电平数较低时, 为了降低输出谐波, 算法将采用载波移相控制, 桥臂电压均衡可采用三级直流稳压方式。

一个双钳位子模块包含两个半桥模块、额外增加的 IGBT 及两个续流二极管, 能够输出 0、 $U_c$ 、 $2U_c$  三种电平, 其中  $U_c$  为单个半桥模块的电容电压。将编号为偶数的半桥 MMC 模块两个 IGBT 的触发脉冲对调, 即可将常规 MMC 的触发算法移植到具备故障隔离能力的双钳位模块中<sup>[19]</sup>。

### 3.2 自愈控制策略

和直流输电系统不同, 多状态开关和交流系统无变压器隔离, 交流系统故障, 尤其是近区故障将直接影响换流器正常运行<sup>[20]</sup>。对于交流故障, 柔性多状态开关检测到过流后闭锁, 此时切断故障电流,

检测到交流电压恢复后，其将自动重启，恢复故障前运行状态；针对直流故障，尤其是背靠背结构下的直流故障，永久故障概率较大，柔性多状态开关通过闭锁切断故障电流，配合直流快速开关分闸，隔离故障后，各端换流器工作在 STATCOM 模式，提供动态无功补偿。自愈控制策略框图如图 7 所示。

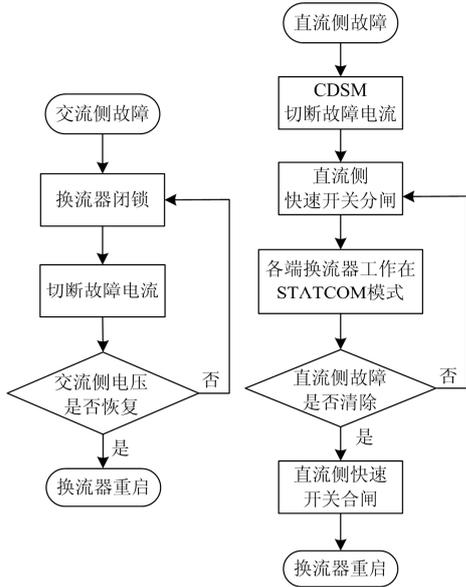


图 7 自愈控制策略框图

Fig. 7 Block diagram of self-healing control strategy

## 4 算例仿真分析

### 4.1 仿真系统简介

基于 PSCAD 建立四端柔性开关电磁暂态仿真模型，连接存在电压差和相位差的三个不同 10 kV 母线。其中 VSC1、VSC2 连接的 10 kV 母线来源于同一个 110 kV 变电站，但由于主变压器参数不同，两条 10 kV 母线电压的幅值和相位有差；VSC3 连接的 10 kV 母线来源于另一个 110 kV 变电站，VSC4 接入 2.5 MW 光伏发电。仿真模型中的系统接线如图 8 所示，其中 10 kV 系统均采用中性点经消弧线圈接地的非有效接地系统。多状态开关的主要参数表如表 1 所示。

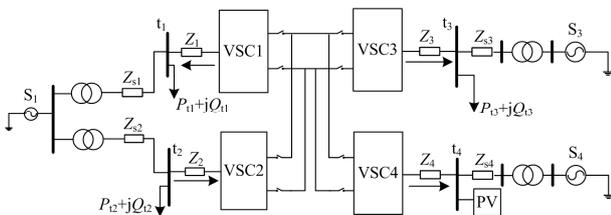


图 8 四端多状态开关仿真示意图

Fig. 8 Four-terminal SMOP simulation diagram

表 1 系统主要参数

参数	数值
VSC1 交流电压/kV	10.5
VSC2 交流电压/kV	10
VSC3 交流电压/kV	11
直流电压/kV	±10
VSC 额定电流/A	330
桥臂模块数	4
桥臂电感/mH	12
模块电容/mF	1
光伏发电/MW	2.5

### 4.2 控制功能仿真

在如图 8 所示的四端多状态开关仿真系统中，以 VSC2 为主，VSC1、VSC3、VSC4 为从系统，VSC2 执行定直流电压控制，其余三端均执行定有功功率控制，协调各端的有功功率分配。

仿真波形如图 9 所示，VSC2 作为系统的整流端，始终将直流极间电压稳定在 20 kV，承担着系统功率平衡控制的功能。0.6 s 时 VSC1、VSC3 和 VSC4 执行有功功率控制，向其交流侧负荷分别提供 3 MW、1 MW 和 -2 MW 的有功功率，可看到  $P_2$  等于  $P_1$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  与系统功率损耗之和；0.7 s 时，改变各端功率参考值，此时  $P_1$  降为 -1 MW， $P_3$  降为 2 MW， $P_1$  升为 1 MW，由波形图可以看出，系统各端实现了潮流调控功能。

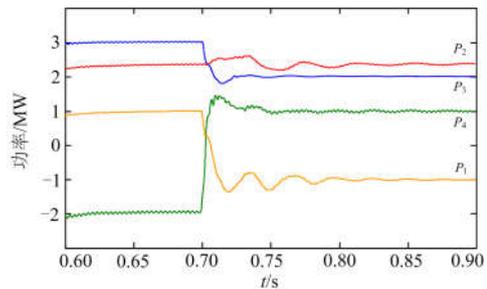


图 9 潮流调节仿真波形

Fig. 9 Load flow control simulation waveforms

### 4.3 自愈控制仿真

自愈控制仿真包括换流器交流侧相间故障以及直流单极接地故障两种工况。

#### 1) 交流侧故障

交流故障扰动穿越能力的测试以区外相间短路为例进行仿真，VSC2 为定直流电压控制，其余三端为定有功功率控制。模拟 VSC1 侧 10 kV 交流线路相间短路，VSC1 过流后迅速闭锁，VSC2、VSC3 作为从系统同时闭锁，直流电流迅速下降为零；

100 ms 后相间短路故障消失, 检测到过流消失、系统电压恢复, 并满足延时条件后 VSC1 首先解锁执行稳压控制, VSC1 重启成功且直流电压稳定运行, 其余各端重启。暂态扰动穿越试验的仿真波形如图 10 所示, 该图从上至下依次为 VSC1 侧的 10 kV 交流电压、交流电流和直流极间电压。从图 10 中可看出, 系统暂态故障期间多状态开关成功实现电容能量锁存, 直流侧电压波动较小, 在故障消失后自动迅速恢复重启从而实现故障自愈。

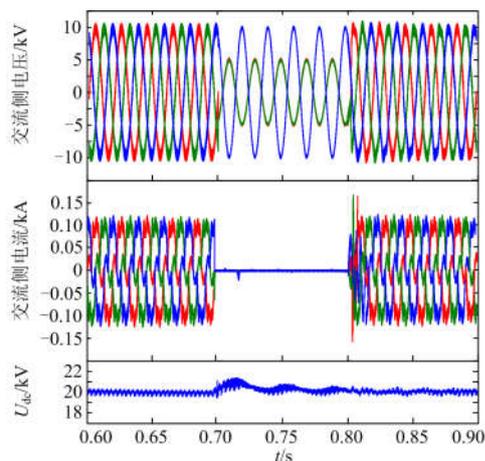


图 10 交流故障自愈仿真波形

Fig. 10 AC fault self-healing simulation waveforms

## 2) 直流侧故障

直流单极接地故障自愈仿真波形如图 11 所示, 发生直流负极接地故障后, 直流负极电位为零, 正极抬高至 2 倍额定电压; 由于直流侧背靠背连接, 四端换流器同时感受到直流故障, 故障后直流电压不平衡导致 VSC1、VSC3、VSC4 均闭锁; 100 ms 后故障清除, 各端换流器重新启动, 各端以无功补偿模式运行。

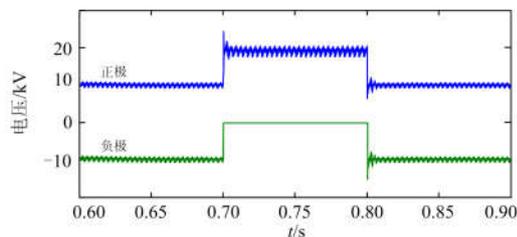


图 11 直流故障自愈仿真波形

Fig. 11 DC fault self-healing simulation waveform

## 5 结论

柔性多状态开关是实现配电网柔性互联与动态重构的重要手段, 其运行模式和控制方式灵活多样, 能够有效加强线路联络, 提高转供能力, 扩展

供电范围。同时, 其具备中压直流端口, 更易于新能源直流接入, 从而促进“能源互联”技术的进一步发展。国内外关于柔性多状态开关的研究尚处于起步阶段, 其在复杂配电网环境下的运行机理与实现手段依然不够明确。

本文对柔性多状态开关的原理与特点作了简要介绍, 设计具有直流故障隔离能力的四端柔性多状态开关拓扑, 建立了其数学模型, 设计了控制系统结构与策略, 并进行稳态功率调节和直流故障自愈的仿真验证, 验证了其拓扑及功能。本文研究内容期望能够推动柔性多状态开关在配电网中的应用, 提升配电网供电灵活性及可靠性。

## 参考文献

- [1] LEE Y, CUI S, KIM S, et al. Control of hybrid HVDC transmission system with LCC and FB-MMC[C] // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 14-18, 2014, Pittsburgh, PA, USA: 475-482.
- [2] CHEN C S, TSAIC T, LIN C H, et al. Loading balance of distribution feeders with loop power controllers considering photo voltaic generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1762-1768.
- [3] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168-175.
- [4] WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.
- [5] BLOEMINK J M, GREEN T C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, USA: 8p.
- [6] 杨欢, 蔡云旖, 屈子森, 等. 配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 153-165.
- [7] YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [8] CAO W Y, WU J Z, JENKIN S N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.
- [9] 王朝亮, 许建中, 赵成勇, 等. 基于单箝位型子模块的 MMC 及拓扑改进方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 74-80.
- [10] WANG Chaoliang, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al.

- MMC based on single-clamp sub-module and improved topology schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 74-80.
- [8] 王朝亮, 许建中, 赵成勇, 等. 基于单箝位型子模块的 MMC 及拓扑改进方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 74-80.  
WANG Chaoliang, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. MMC based on single-clamp sub-module and improved topology schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 74-80.
- [9] DEGRAAFFR A A, MYRZIKJ M A, KLING W L, et al. Intelligent nodes in distribution systems-optimizing steady state settings[C] // IEEE Lausanne Power Tech, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: 391-395.
- [10] GAO Hongjun, LIU Junyong, WANG Lingfeng, et al. Decentralized energy management for networked microgrids in future distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3599-3610.
- [11] 王聪, 徐晓贤, 沙广林, 等. 基于能量路由器的交直流混合微网潮流计算[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(7): 33-40.  
WANG Cong, XU Xiaoxian, SHA Guanglin, et al. Power flow algorithm of AC/DC microgrid based on energy router[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(7): 33-40.
- [12] 李笑倩, 刘文华, 宋强, 等. 一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6389-6397.  
LI Xiaoqian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with dc fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6389-6397.
- [13] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus- applications[C] // 2010 International Power Electronics Conference(IPEC), June 21-24, 2010, Sapporo, Japan: 502-507.
- [14] 郝瑞祥, 杨晓峰, 薛尧, 等. 一种具有直流故障限流能力的模块化多电平换流器[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 172-180.  
HAO Ruixiang, YANG Xiaofeng, XUE Yao, et al. A novel multilevel converter with DC fault current limiting capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 172-180.
- [15] 刘云, 荆平, 李庚银, 等. 直流电网网络输电模式及其输电分配技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊 1): 25-35.  
LIU Yun, JING Ping, LI Gengyin, et al. Research on the mesh network mode and distribution technology of the DC grid power transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S1): 25-35.
- [16] 赵国鹏, 何彦良. 三端柔性环网控制装置的功率调度模型与边界条件研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 17-24.  
ZHAO Guopeng, HE Yanliang. Research on power dispatch model and boundary condition of three-terminal flexible loop network controller[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 17-24.
- [17] BAI L, JIANG T, LI F, et al. Distributed energy storage planning in soft open point based active distribution networks incorporating network reconfiguration and DG reactive power capability[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1082-1091.
- [18] 屠卿瑞, 徐政, 管敏渊, 等. 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 57-61, 83.  
TU Qingrui, XU Zheng, GUAN Minyuan, et al. Design of circulating current suppressing controllers for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 57-61, 83.
- [19] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55.  
ZHAO Xin, ZHAO Chengyong, LI Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.
- [20] 蔡宜君, 文明浩, 陈玉, 等. LCC-MMC 混合直流输电系统整流侧故障穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 1-8.  
CAI Yijun, WEN Minghao, CHEN Yu, et al. Control strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under rectifier side fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 1-8.

收稿日期: 2018-08-17; 修回日期: 2018-11-09

作者简介:

高泽盟(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性输电技术; E-mail: 1032924207@qq.com

葛菁(1991—), 女, 硕士, 主要研究方向为电力电子技术、柔性输电技术。E-mail: gjsonia@sina.com

(编辑 姜新丽)